

Objectifs :

Ce module a pour objectif de former les étudiants aux outils méthodologiques d'estimation des coûts et d'évaluation des investissements des projets. Les outils d'estimation enseignés concerneront trois types de projet :

- l'acquisition d'équipement de systèmes ou ouvrages, c'est le cas d'une infrastructure,
- la mise au point d'un produit ou un matériel destiné à être mis en vente sur le marché,
- la réalisation d'un investissement répondant à un ouvrage ou équipement.

Les démarches et outils d'estimation concerneront : les méthodes d'estimation paramétriques, analogiques et analytiques. Elles intégreront également facteurs d'évolution des coûts dans le temps.

Plan du cours :

1 Pour quoi faire une évaluation des coûts ?

1.1 Définitions : évaluation technico-économique et conception

- 1.1 Produit ou service ?
- 1.2 Conception ou reconception ?
- 1.3 Estimation locale ou estimation globale ?

2 Intégration de l'estimation du coût dans la conception

- 2.1 Méthodes d'estimation du coût en conception de produit/projet
- 2.2 Le chiffrage, quelles données ? Quels inducteurs ?
- 2.3 Techniques d'identification des inducteurs
- 2.4 L'approche analytique : ABC
- 2.5 L'approche Analogique
- 2.6 L'approche Paramétrique

3 Construction d'une fonction d'estimation du coût (FEC)

- 3.1 Démarche générale
- 3.2 Facteurs d'évolutions des coûts dans le temps
- 3.2 Mesures de validation de la FEC
- 3.3 Applications

4 Modèles métier et intégration de la fabricabilité dans la conception

- 4.1 PBCM Process Based Cost Modelling et approches émergents
- 4.2 Le Design for Manufacturing (DFM) (conception en vue de la fabrication)

Bibliographie Principale : Yannou, Robin, Camargo, Micaelli, Roucues. ***La conception Industrielle de produits, volume 2 : spécifications, déploiement et maîtrise de performances***. Chapitre 4. Hermes-Lavoisier 2008.

1 Pour quoi faire une évaluation des coûts ?

La conception de produit industriel diffère d'une démarche intuitive par le fait qu'elle repose sur une estimation technico-économique systématique. Le besoin qui motive le développement du produit industriel impose des objectifs que le concepteur doit prendre en compte tout au long du projet et à toute étape de son activité. En amont, pour cadrer et cibler les objectifs qui devront être atteints par le produit. En aval, pour estimer les implications de ses choix ou les justifier [STA 00]. En cours d'activité, pour apprécier les dérives éventuelles entre les objectifs et les résultats intermédiaires obtenus.

Estimation technico-économique

Estimer, en conception, consiste à anticiper la valeur d'une variable. Cette estimation est dite technico-économique si les variables prises en compte sont relatives à la fois à la *performance technique*, au *besoin* et au *coût*. Une telle estimation n'est pas réalisée pour elle-même ; elle assure une fonction, elle répond à un besoin. Sans prétendre à l'exhaustivité de ses cas d'usage, elle sert à :

- cadrer et cibler les objectifs du projet de conception, du produit ou de ses composants ;
- élaborer une proposition commerciale, si le projet de conception est initié dans le cadre d'une réponse à un appel d'offres ;
- simuler les effets, valider et choisir des solutions de conception d'après les valeurs atteintes par les solutions de conception candidates ;
- réitérer l'activité de conception, si ces valeurs sont insatisfaisantes, l'arrêter en cas contraire [SIM 97] ;
- apprécier les dérives et les risques, et les gérer en imaginant des actions visant à les lever ;
- renégocier le besoin si, par exemple, la demande du client ne peut être atteinte avec la contrainte de coût énoncée ;
- obtenir des économies globales en répartissant les efforts de réduction de coût sur l'ensemble des composants intégrés dans l'architecture du produit ;
- optimiser un composant de la solution retenue en termes de valeur et de coût ;
- arbitrer entre les fournisseurs de sous-systèmes ou composants d'après les devis envoyés au concepteur ;
- optimiser l'usage des futures ressources de production requises pour fabriquer le produit ;
- contribuer à la cohérence du projet, parce que l'estimation lie les différentes caractéristiques techniques du produit et qu'elle est assurée de façon continue tout au long du projet de conception [MIC 03] ;
- répondre aux exigences de rentabilité du projet fixées par la Direction de l'entreprise, etc.

1.1 *Produit ou service ?*

Bien qu'utilisant le mot « produit », nous ne désignons pas par ce terme un objet technique simple. Le produit comprend le plus souvent différents composants agencés de façon méthodique. De ce fait, il peut être vu comme un système et plus précisément une architecture, un projet un bien ou un service. Les méthodes et les outils proposés s'appliquent en partie aux services, aux systèmes d'information, voire aux organisations. Nous utiliserons ici le terme de produit.

1.2 *Conception ou reconception ?*

La conception du produit industriel part rarement d'une page blanche. Le nouveau produit est, dans l'immense majorité des cas, une reconception de produit existant, avec des degrés de remise en cause plus ou moins importants. Le concepteur dispose donc, avant de se lancer dans le projet de conception courant, de classes de produits référents déjà constituées. Celles-ci peuvent être vues comme un stock d'informations techniques et économiques non négligeable, à partir duquel il pourra réaliser son estimation technico-économique future. Cette situation de « continuité technique » [OUL 06b] présente à la fois des avantages, comme celui de pouvoir effectuer des projections et des analogies à partir du passé, et des risques, comme celui de rester prisonnier d'une certaine vision du produit, des solutions habituelles, mais aussi de leurs performances et de la structure-même de leurs coûts [EHR 95], intimement liée à la nature des options techniques retenues.

1.3 Estimation locale ou estimation globale ?

Peut-on se contenter d'une estimation locale, c'est-à-dire ciblée sur un composant et recourant à une seule des trois variables évoquées : performance technique, besoin, coût ? Au contraire, faut-il estimer globalement le produit ? Mais alors, quel est le périmètre d'une telle estimation, dont on a l'intuition qu'elle est idéale.

L'estimation technico-économique globale se veut d'abord une estimation décentrée. Elle prend en compte non le point de vue du seul concepteur, mais celui d'une partie prenante du produit (demandeur, utilisateur, client, maintenancier, etc.). Elle prend aussi en compte le système de production. Il ne peut être établi de coût du produit sans tenir compte des ressources requises pour le fabriquer. Là encore, il faut donc, pour le concepteur, envisager le point de vue du fabricant. Idéalement, le concepteur ne doit pas tenir compte du seul coût de production du produit. Il doit élargir son horizon et raisonner en terme de « coût global » (AFNOR X 50-155, 1997) (life cycle cost) couvrant l'ensemble de son cycle de vie. D'où les définitions suivantes.

Cycle de vie du produit : ensemble des situations par lesquelles passe le produit à partir de sa création jusqu'à sa disparition.

Coût global : ensemble des dépenses directement affectables au produit développé pour les usages répartis sur l'ensemble de son cycle de vie.

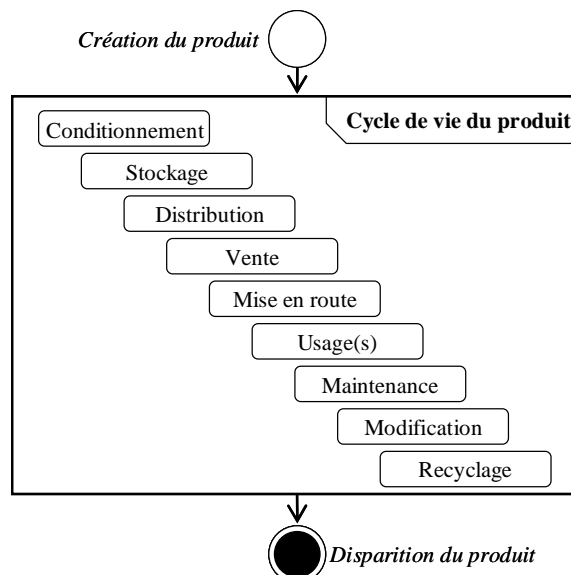


Figure 1. Cycle de vie courant pour un produit industriel

2 Intégration de l'estimation du coût dans la conception

Dans le processus général de réalisation d'un produit, c'est au moment de la conception où les premiers choix sur le futur produit sont faits. Ces choix de conception fixent les caractéristiques techniques du produit. Ces caractéristiques de conception vont conditionner les caractéristiques de fabrication et donc ainsi déterminer en grande partie le coût global du produit.

C'est en effet suite à la conception du produit, alors qu'à peine 10 à 15 % des coûts sont dépensés que 80 % des coûts sont engagés (figure 2).

De plus, outre l'évolution du rapport entre coûts engagés et dépenses réelles, les possibilités d'influencer le coût final du produit diminuent pendant son processus d'élaboration. En effet, les principales caractéristiques du futur produit sont définies dès le début de ce processus par les premiers choix de conception. Ces choix comme nous l'avons vu précédemment, fixent en grande partie le coût final du produit. Ainsi, au cours de l'avancement du processus d'élaboration du produit, les possibilités d'influencer le coût final sont de plus en plus faibles et le coût des modifications possibles de plus en plus élevé (figure 3).

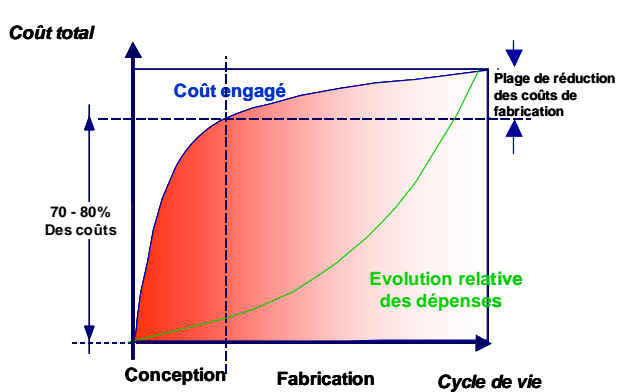


Figure 2. Evolution des dépenses et de l'engagement des coûts d'un produit

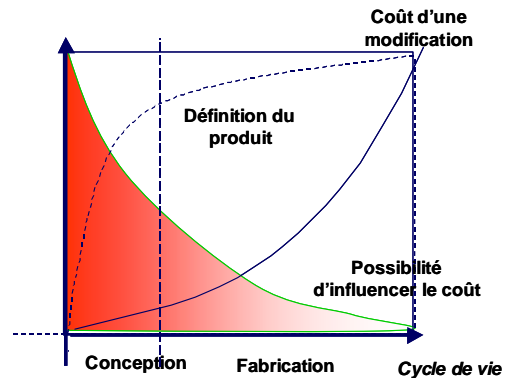


Figure 3. Efficacité des modifications

Ces différents éléments concernant le rapport entre coûts et conception montre qu'il est nécessaire de considérer le coût du produit ou du projet comme un critère de conception au même titre que ses caractéristiques techniques.

Décision dans les divers stades de conception.

La conception d'un produit est un processus itératif de décision se réalisant dans la tête du concepteur et qui se complète au fur et à mesure que des informations sur les objectifs de marché, la fonctionnalité du produit et des considérations de fabricabilité sont définies.

D'un point de vue technico-économique, ces itérations sont déterminées en fonction du rapport « valeur perçue par le client- coût ». En conséquence, il existe différents types d'approches applicables selon l'état d'avancement du produit dans son cycle de conception. La pertinence de l'approche utilisée dépend du type de décision à prendre (opérationnel, tactique, stratégique), du niveau d'agrégation (produit ou composants), du type d'utilisateur (designer, planificateur, investisseur) ainsi que de l'information disponible et de la précision demandée par le décideur.

Une classification relative aux phases d'évolution d'un produit couramment utilisée définit celles-ci comme étant conceptuelle, globale et détaillée (figure 4). Plus le produit est défini, plus on a de certitudes concernant ses caractéristiques et son processus de production interne ou externe.

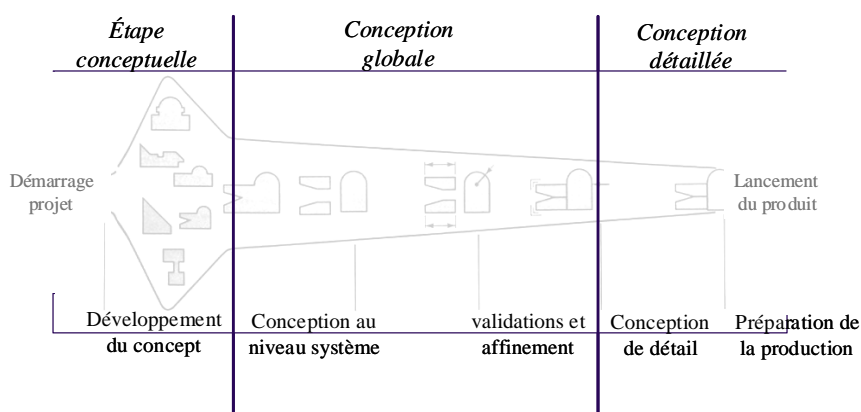


Figure 4. Découpage en étapes, reconnaissance des éléments de décision à chaque étape

Ainsi dans la **phase conceptuelle**, l'utilisateur n'est pas en mesure de spécifier les détails techniques de fabrication du produit. C'est dans cette phase que l'estimation des coûts est la plus difficile et dans laquelle il doit faire appel à son expérience, à son savoir-faire, à des experts (internes ou externes) ou aux outils disponibles en fonction de l'objectif recherché.

Dans la **phase globale**, l'information concernant le produit est plus complète et détaillée. Cependant, celle correspondant au processus n'est pas encore complètement définie, ce qui explique les incertitudes propres à cette phase.

Finalement en **phase détaillée**, on dispose de toutes les informations concernant les spécifications et la définition du produit. L'utilité d'une estimation des coûts dans cette phase est liée à la planification et à l'optimisation des ressources nécessaires pour la mise en œuvre d'un lot de fabrication.

Afin de mieux comprendre l'ensemble des méthodes et des approches existantes, nous proposons un classement selon deux familles, **génératives** ou **adaptatives** (Tableau 1).

La famille des méthodes génératives se base sur une décomposition détaillée du processus de production espéré. Elle comprend l'ensemble des approches analytiques pour lesquelles les coûts sont calculés sur la base d'information en provenance des composants du produit, du système de fabrication et des activités de support que l'entourent (gamme opératoire, nombre d'opérations ou temps de fabrication). Les méthodes les plus représentatives de cette famille sont la comptabilité analytique, la comptabilité basée par activités (Activity Based Costing) et la décomposition en éléments et tâches élémentaires du produit.

La famille des méthodes adaptatives sont quant à elles basées sur le principe du GT (Groupe Technologique), principe selon lequel on considère que les produits d'une famille partageant les mêmes opérations de fabrication ont des similarités permettant de trouver des caractéristiques communes (pilotes - inducteurs de coûts). On retrouve ici les approches de type paramétrique telles que les modèles universels, les modèles spécifiques et la méthode des barèmes et celles de type analogique telles que le jugement d'expert, le raisonnement à partir de cas et les systèmes à base de connaissances.

Méthodes	Approche	Outils
adaptatives	analogique	Consultation d'experts émettant un jugement
		Explicitation du jugement de l'expert à partir de raisonnement à base de cas (CBR, <i>Case Based Reasoning</i>) ou de développement d'un système basé sur les connaissances (KBS, <i>Knowledge Based System</i>)
	paramétrique	Barèmes (méthode utilisée en BTP, bâtiment travaux publics)
		Ordre de grandeur
		Fonction d'estimation de coût (FEC) (CER, <i>Cost Estimation Relationship</i>)
génératives	analytique	Décomposition modulaire (WBS, <i>Work Breakdown Structure</i>) et estimation de chaque module
		Coûts basés sur les activités (ABC, <i>Activity Based Costing</i>)

Tableau 1. Typologie des méthodes d'estimation du coût en conception de produit

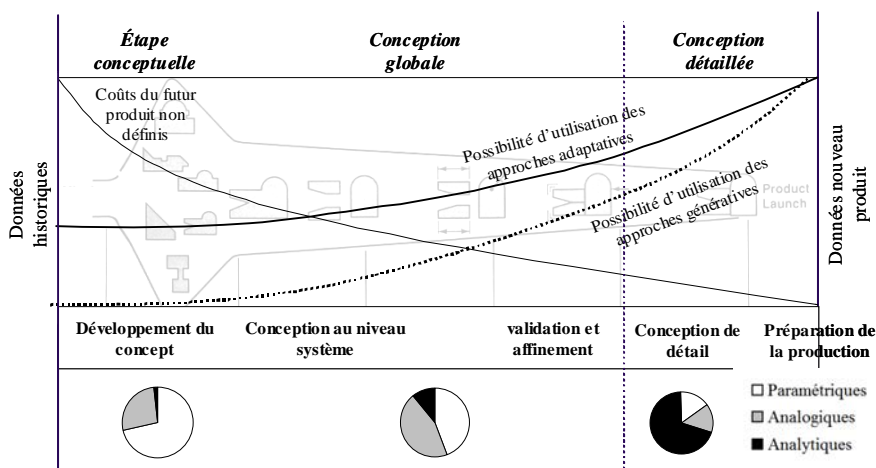


Figure 5. Pertinence des modalités d'estimation selon la phase du cycle de conception

2.1 Méthodes d'estimation du coût en conception de produit/projet

Avant de décrire les méthodes deux considérations importants :

a. la délimitation du **périmètre de validité** de l'estimation du coût : Quelle que soit la modalité retenue pour chiffrer le produit (coût analogique, paramétrique, détaillé), se pose toujours la question de savoir quel coût le concepteur estime et gère. S'agit-il du coût de la conception, de la production du produit réalisé en fin de conception, de sa distribution, de sa possession, de son cycle de vie complet ? Ou, pour le dire autrement, à quel système de coût fait référence le concepteur lorsqu'il chiffre le produit dont il assure le développement ?

b. l'identification des facteurs qui influencent et expliquent le coût du produit, ou **inducteurs de coûts** (*cost drivers*). Identifier les inducteurs de coût est une question centrale, qui repose encore largement sur des jugements d'experts et qui, de ce fait, est l'un des points obscurs de l'art du chiffrage.

2.1.1 Quel système de coût à la base du chiffrage ?

Il est possible de distinguer deux approches croisées :

- la première utilise comme critère discriminant le caractère complet du coût (*full cost*) ou non (*direct cost*). Dans le premier cas, le coût est partagé entre coût direct et coût indirect ;
- la seconde, qui ne s'applique en fait qu'au sous-ensemble des coûts directs discrimine les coûts selon leur caractère, fixe ou variable. Les coûts variables sont ceux qui évoluent en fonction du nombre d'éléments produits, comme les coûts matières ou la main d'œuvre. Le terme de récurrents est parfois utilisé. Les coûts fixes, ou non récurrents, comme par exemples les frais d'études, sont indépendants du nombre de pièces produites.

En juxtaposant ces deux critères, il est possible de distinguer quatre catégories de coût, comme le montre le cadre au premier plan sur la figure 6. Ces catégories sont indépendantes du temps. Or, nous avons vu que tout produit a un cycle de vie. Il est utile, pour le concepteur, de disposer d'un système de coût dynamique, couvrant l'ensemble du cycle, de façon à pouvoir estimer et gérer le coût global. En tenant compte du temps, il est donc possible de démarquer les systèmes de coût statiques, dominants dans la pratique industrielle, qui ne prennent en compte que les coûts de production, du système du coût global (figure 6), seul à même de prendre en compte tout ou partie du cycle de vie du produit.

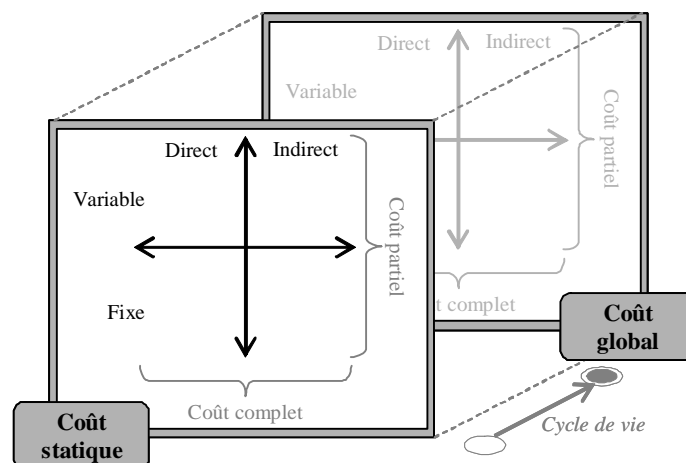


Figure 6. Typologie des systèmes de coûts

2.1.2. Le chiffrage à l'aide du coût complet

Dans le système du coût complet, les coûts sont classés par rapport à la traçabilité des dépenses faites par les unités opérationnelles d'une entreprise, appelées centres d'analyse. Un système de coût complet de qualité permet d'estimer sans erreur le résultat comptable de l'entreprise. Or, ce critère n'a pas de sens pour le concepteur, qui désire des coûts qui peuvent être facilement couplés à son modèle de produit et bien intégrés de ce fait dans son activité. De plus, les coûts, selon qu'ils sont directs ou indirects, n'ont pas la même facilité d'emploi pour lui. Les coûts directs peuvent être

alloués directement par unité d'œuvre, c'est-à-dire sur une base d'allocation connue comme la consommation d'énergie par kg, la durée de l'opération de fabrication, etc. Certaines de ces unités peuvent correspondre aux caractéristiques de performances techniques du produit, si bien que le passage de la conception à l'estimation peut se faire sans difficulté, et dans les deux sens. Par contre, le traitement des coûts indirects pose un redoutable problème. Le concepteur ne peut pas remonter à la définition des clés de répartition, si bien qu'il ne peut émettre de jugement sur la qualité de la donnée de coût utilisée. De plus, l'étude de rentabilité du projet peut être faussée, du fait de l'inégale contribution des produits à la couverture des frais fixes communs.

Pour illustrer ces deux questions, la figure 7 montre, dans le cas du système du coût complet statique, l'ensemble de charges qui peuvent être incluses dans le chiffrage mené par le concepteur. Une étude menée dans le secteur du textile montre que le concepteur ne prend en compte que les charges correspondant à des éléments sur lesquels il pense le plus facilement agir. Dans la figure suivante ces éléments sont représentés par les trois premiers blocs : matières premières et composants (de quoi est composé le produit ?), coût de revient atelier (comment est-il fabriqué ?) et frais indirects de fabrication (quels sont les effets du nouveau produit sur le procédé et le process, donc sur les coûts des fonctions supports : maintenance, par exemple).

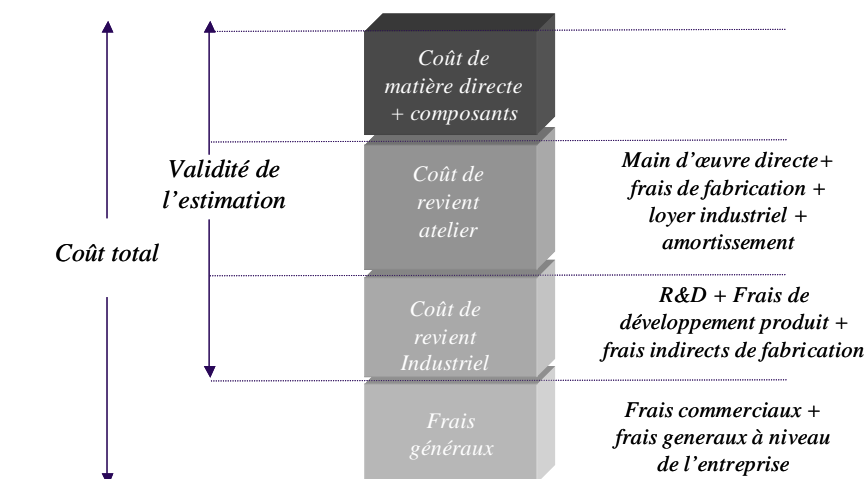


Figure 7. Différents périmètres d'estimation en conception

2.1.3. Le chiffrage à l'aide du coût direct

Le système du coût direct (partiel) repose sur la simplicité de l'analyse causale. En rattachant les charges directement à la description et au dimensionnement du produit et en connaissant les liens entre performances du produit et sa description et son dimensionnement, il apparaît qu'il est *a priori* aisé d'aller des performances techniques à son coût, et réciproquement, pour un concept de solution donné. Le système de coût direct se complique lorsqu'on distingue les coûts variables des coûts fixes. Les premiers varient avec l'échelle de production, de façon linéaire ou par sauts (coûts semi-variables), alors que les seconds sont supposés constants. Une fonction d'estimation du coût (FEC) renvoyant au système du coût partiel se présente toujours sous la même forme. Pour calculer le coût total unitaire d'un produit i , il suffit de faire l'addition des coûts fixes (C_f), et des coûts variables (C_v). Ainsi :

$$\text{Coût_unitaire}(i) = \frac{1}{n_i} [C_v(n_i) + \sum C_f(n_i)] \quad (1)$$

Avec : n_i la quantité d'unités produites. Le calcul du coût variable C_v de i est effectué en distribuant les coûts fixes comme un index multiplicateur en fonction de la consommation de main d'œuvre, matière première ou temps d'utilisation des machines concernées, par exemple.

2.2 Le chiffrage, quelles données ? Quels inducteurs ?

Pour ce faire, sont à la fois requis l'avis d'experts en chiffrage et la collecte et l'analyse de données statistiques historiques. Cette collecte est lourde, bien évidemment. Pour compenser ce désagrément, on sait que la fiabilité de

L'estimation obtenue s'améliore en fonction du volume de données de base. Toutefois, la donnée n'est pas tout. Il convient d'identifier les inducteurs de coût dont deux types peuvent être définis utilement :

- les inducteurs quantifiables, qui peuvent être exprimés comme une valeur précise : la masse, le nombre de pièces, le nombre de couleurs, etc. ;
- les inducteurs subjectifs (qualifiables), définis sur l'échelle de valeurs d'un expert. Il peut s'agir du degré de complexité de fabrication, de la qualité perçue du produit, etc.

Ce dernier type s'intègre difficilement dans les modèles d'estimation. C'est tout particulièrement le cas pour l'aspect esthétique d'un produit. Les descriptions sont faites à l'aide de labels linguistiques parfois ambigus ou n'ayant aucun lien avec le processus de production, donc avec les ressources consommées pour fabriquer le produit, donc avec le coût. De plus, les échelles de valeur ne sont pas clairement définies.

Dans tous les cas, l'expérience montre qu'il existe des interrelations très fortes entre inducteurs de coût, qu'ils soient purement quantifiables, subjectifs ou mixant les deux. Par exemple, un choix de conception portant sur l'épaisseur du produit peut baisser le coût d'obtention de cette qualité, mais en augmenter un autre, lié par exemple à son usage ou à sa maintenance, si cet amincissement impose des précautions d'usage ou une fiabilité moindre. Il revient alors au concepteur de procéder à un arbitrage (*trade off*) entre inducteurs. Un autre cas, tout aussi classique peut se présenter. Le choix d'une matière peu coûteuse peut entraîner des opérations de fabrication supplémentaires ou plus complexes, ce qui augmente d'autant les coûts de fabrication.

Pour traiter de la difficile question de l'interrelation entre inducteurs, il est possible de reprendre les conclusions d'une étude réalisée par Weustink à la fin des années 1990. Celui-ci conclut que les coûts engagés durant la phase de conception d'un produit sont définis, dans la plupart de secteurs d'activité, par les paramètres mutuellement corrélés suivants : la géométrie, la matière première (poids, épaisseur) et le processus de production (manuels, automatisés). Ainsi, la géométrie inclut la forme, les dimensions et la qualité (précision). Elle définit en même temps la quantité de matière requise, donc les procédés nécessaires. De même, les ressources nécessaires pour réaliser les processus de production, qui sont choisies en fonction de leurs capacités et des restrictions techniques (la puissance de la machine, la précision, la taille maximale de chaque pièce, etc.), peuvent aussi devenir des inducteurs prédominants lorsque l'on dispose de ces informations. Au final, l'identification des interrelations et des prédominances permet de réduire le nombre d'inducteurs pris en compte par le concepteur, ce qui facilite le chiffrage.

2.3 Techniques d'identification des inducteurs

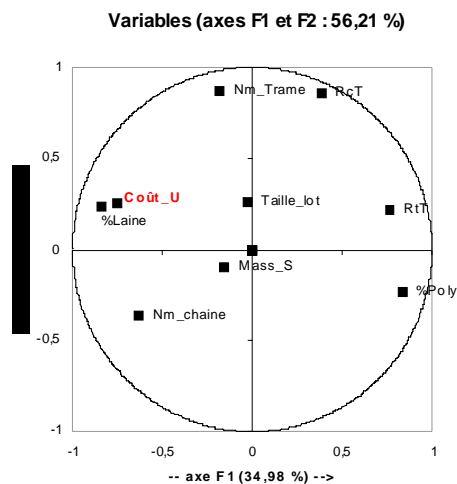
Tout d'abord, pour procéder au chiffrage courant, nous avons vu qu'il faut combiner jugements d'experts et analyse de données statistiques historiques. Quelle que soit la source choisie, ces données sont variées et hétérogènes. Elles sont économiques et concernent par exemple le contexte de l'activité industrielle : prix de matières premières dont les cours sont volatils, coût des équipements, salaires, etc. Elles concernent aussi les spécifications du produit, telles que les matières requises, les dimensions, la gamme, les qualités attendues, etc. Enfin, tous les paramètres de fabrication, comme la capacité de fabrication, le taux de rebuts, les temps standards, etc., peuvent être utiles. Eu égard à une telle variété, il faut assurer la cohérence des informations récoltées. Avant d'initier l'analyse, il convient en outre d'ajuster les données en tenant compte d'hypothèses liées à la fois au contexte monétaire - puisque l'inflation ou les taux de change modifient le niveau des achats, donc du coût - et au contexte technologique, puisque l'échelle de production du produit est cumulée sur plusieurs périodes. Une fois ces préalables accomplis, une analyse statistique peut être réalisée, qui vise à :

- identifier les inducteurs ;
- visualiser et vérifier la présence de données aberrantes, de comportements singuliers, ou de groupes d'inducteurs qui méritent une analyse particulière ;
- vérifier le sens d'influence des inducteurs faisant partie de la base ;
- identifier les inducteurs redondants. Ce qui permet une première simplification ;
- réduire le nombre d'entrées du modèle, de sorte à procéder à une seconde simplification.

Pour mener à bien cette démarche, diverses techniques statistiques peuvent être utilisées, depuis les matrices de corrélation jusqu'à la classification ascendante hiérarchique en passant par l'Analyse en Composantes Principales (ACP), sachant que cette dernière est la plus utilisée.

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique (initialement de statistique descriptive) qui a pour but de comprendre et de visualiser comment les effets de phénomènes *a priori* isolés se combinent. Dans notre cas particulier cette visualisation permet d'identifier la combinaison des variables explicatives de conception (inducteurs de coûts) et la variable expliquée (coût).

La procédure multivariée de l'ACP permet de faire une rotation des données de telle façon que les variations soient projetées sur des plans (composantes ou axes factoriels) délimités par un cercle de corrélation, comme le montre la figure 8. On regarde ensuite, pour chaque composante, quelles sont les variables qui se suivent ou qui s'opposent. Plus une variable a d'importance, plus elle sera proche du cercle. La corrélation est manifestée par la position des variables par rapport à la variable expliquée.



Ainsi, pour les variables positionnées autour du coût dans le même quadrant de la figure, nous pouvons dire qu'elles sont positivement corrélées avec le coût. À l'inverse, celles situées à l'opposée de la figure seront négativement corrélées. Ces variables sont considérées comme des combinaisons linéaires des variables originales, c'est-à-dire, pour ce qui nous concerne, des inducteurs de coût. Enfin, afin de faciliter l'analyse, les variables jugées les moins explicatives pourront être supprimées sans perte significative d'information. L'ACP permet de réduire la dimension de la base de données, tout en gardant un niveau d'information jugé satisfaisant. En effet, les deux premières composantes expliquent la plus grande partie de la variation.

Figure 8. Exemple cercles de corrélation entre variables (ACP)

2.4 L'approche analytique : ABC

Nous avons vu que la méthode analytique repose sur la décomposition détaillée du produit et de l'ensemble de ses tâches de fabrication (gamme de fabrication). De ce fait, cette méthode est utilisable :

- en conception routinière, comme dans certains cas de construction de bâtiments ou d'ouvrages d'art standard ;
- en phase de conception aval, lorsque le concepteur dispose de dessins de réalisation, du planning du processus de production, de la gamme opératoire de production, etc. ;
- dans le cas d'un produit modulaire totalement « découpé ».

Pour comprendre ces trois conditions, il faut d'abord savoir que pour mener à bien une estimation analytique, il importe de réaliser l'organigramme technique des tâches, c'est-à-dire de décomposer l'architecture du produit et le projet en tâches primaires, jusqu'à leur degré de détail le plus fin, en blocs, ou Work Breakdown Structure (WBS). Cet organigramme s'apparente à un arbre représentant la description technique des ressources (machines, hommes, etc.) et des services nécessaires pour accomplir une gamme de fabrication particulière. Les coûts sont calculés individuellement, à partir des éléments les plus bas de l'arbre, puis additionnés au fur et à mesure qu'on remonte dans l'arbre, jusqu'à atteindre l'élément du plus haut, niveau correspondant au coût total du produit. On le voit, cette méthode n'a de sens que dans le cas de la conception d'un produit modulaire dont les composantes sont déjà bien connues.

La méthode ABC (Activity Based Costing) dérive pour partie de la méthode analytique, sauf que l'architecture du produit et de l'entreprise se complexifie un peu. Pour l'ABC, chaque composant de base est une activité qui consomme des ressources selon une loi donnée et génère ainsi un coût direct (figure 9). De ce fait, l'ABC :

- distingue les inducteurs de coût et leurs lois de variation selon l'activité visée ;
- identifie les impacts du choix de conception sur l'ensemble des coûts indirects, puisque les relations causales entre activités sont censées être plus simples que le tableau de répartition du coût complet ;

- encourage la standardisation des composants, puisqu'elle met en garde contre l'hétérogénéité des lois de consommation des ressources par les produits ;
- renvoie à un type d'architecture bien connue du concepteur, si bien qu'elle est, pour lui, plus ergonomique, plus facile d'accès et d'appropriation que le coût complet.

Bien évidemment, l'ABC présente des inconvénients significatifs. Outre le coût élevé de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de reconstituer le coût global, puisque celui-ci concerne des activités bien différenciées, jalonnées à différents moments du cycle de vie du produit. De plus, le couplage entre l'arborescence du produit et celle des activités de l'entreprise est rarement bijectif. L'ABC reste une méthode comptable, donc reposant sur un modèle d'entreprise, et non sur un modèle de produit.

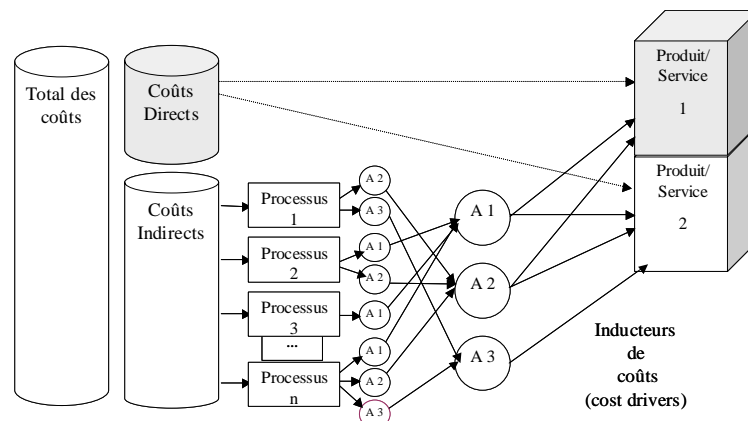


Figure 9. Architecture de type ABC

2.5 L'approche Analogique

Consiste à prédéterminer le coût d'un produit par comparaison avec les coûts de produits déjà connus. Cette approche fait jouer pleinement l'hypothèse de continuité technique et économique. Par exemple, pour des applications en mécanique, on suppose que ce principe analogique est applicable à une forme géométrique ou à une tolérance spécifique. Il est en effet plus que probable que le processus de fabrication et son coût soient, à un facteur d'échelle près, équivalents.

Les ressemblances entre les caractéristiques du produit à concevoir et celles des produits référents se traduisent par des degrés de **similarité**. La mesure de similarité, qui est au cœur de l'approche analogique, relève le plus souvent d'un jugement d'expert. Un cas particulier de résolution de problème par analogie concerne le raisonnement à partir de cas (Case Base Reasoning, CBR), lequel a été utilisé pour le chiffrage de produits mécaniques ou logiciels.

Les avantages de l'approche analogique sont réels. Le premier d'entre eux est qu'elle peut être appliquée en conception amont, comme le montre la figure 5. En outre, cette approche adaptative :

- facilite la collecte et l'exploitation rapide de données historiques ;
- améliore la cohérence de l'estimation des coûts ;
- favorise la codification de l'expertise de chiffrage, notamment pour expliciter les similarités et réutiliser les inducteurs déjà identifiés et validés dans des projets de conception passés.

En revanche, ses inconvénients ne sont pas négligeables. L'estimation analogique est fortement dépendante du jugement de similarité émis par un expert, donc d'une interprétation du passé. De plus, elle suppose un effort significatif du codage des caractéristiques des produits. Enfin, elle présente un réel manque de flexibilité. Celui-ci est exprimé par la difficulté à l'utiliser en cas de conception d'un produit dont le concept, les fonctions attendues, l'architecture, voire les composants majeurs, rompent avec l'existant.

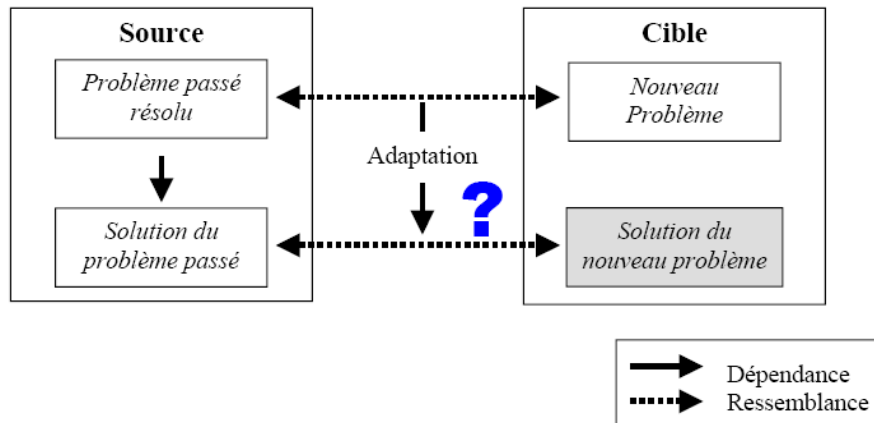


Figure 10. le processus analogique [DUV,97]

2.6 L'approche Paramétrique

L'estimation paramétrique est fondée sur l'hypothèse de l'influence des paramètres techniques de conception sur le coût du produit. Sur cette base, il est possible d'établir une relation quantifiant cette influence. En choisissant judicieusement les paramètres, il est possible de calculer le coût probable du produit et de justifier ce calcul dès les phases amont de la conception, sans avoir besoin de décomposer le produit au niveau le plus détaillé, comme dans le cas de l'approche analytique.

À ce jour, deux catégories de modèles paramétriques existent :

- les modèles universels, supposés applicables quels que soient les secteurs et les produits ;
- les modèles spécifiques, composés de fonctions d'estimation de coût (FEC) développées pour un contexte précis (métier, secteur, produit, etc.) et lui seul.

Dans les deux cas, la base de l'approche paramétrique consiste en des modèles de régression sur des expériences passées, c'est-à-dire une équation centrale exprimant le coût en fonction des **inducteurs de coûts** (masse, complexité, géométrie, gamme etc.) , le plus souvent de façon linéaire. Leur mise au point suppose que la forme de l'équation centrale du modèle soit connue et que le nombre d'expériences passées soit suffisant.

$$\text{Coût} = f(\text{masse, complexité} \dots)$$

Les premiers travaux d'estimation paramétrique du coût datent des années soixante et sont dus à Frank Freiman. Ses études intersectorielles lui ont permis de trouver des similitudes dans les démarches des chiffreurs et l'ont amené au développement d'une théorie générale du coût paramétrique. En 1976, Freiman a développé un logiciel, connu sous le nom de Price ®. Cette application repose sur une seule formule : le coût est fonction de la masse et de la complexité. Selon les secteurs, la forme de la fonction ou la valeur des paramètres changent. D'ailleurs, et c'est le reproche souvent fait à cet outil, ces paramètres ne sont pas explicités, ce qui le réduit à une boîte noire non documentée. De plus, l'étalonnage et le calibrage des paramètres est long et fastidieux, alors que les résultats obtenus sont souvent jugés par les utilisateurs comme trop grossiers.

Les modèles paramétriques spécifiques se veulent plus précis. Ils reposent sur une fonction d'estimation des coûts (FEC), ou expression mathématique qui décrit le coût comme une fonction d'un ou plusieurs inducteurs dépendant du secteur, du métier, de la classe de produit, etc. Contrairement aux modèles du type universel, les modèles spécifiques sont des combinaisons de FEC développées à la demande, en fonction du contexte d'utilisation. Le principal avantage de ces modèles est de réaliser des estimations rapides, tout en évitant d'avoir un grand volume d'information. Les types de FEC les plus couramment utilisés sont ceux issus de la régression, obtenus généralement par la méthode des moindres carrés. Plus récemment, les techniques du soft computing ont été utilisées pour identifier ou calibrer la fonction d'estimation de coût. Leur principal avantage est de bien approcher des fonctions non linéaires et de ne pas présupposer de la forme de la FEC. En effet, ces techniques modélisent la FEC à l'aide de la logique floue, des réseaux de neurones [CAM 06], des systèmes à base de règles, des arbres de décision, etc. [DON 03]. Toutefois, malgré leur bonne précision et la qualité de leur simulation (une étude de sensibilité sur le modèle paramétrique obtenu permet d'observer les effets d'une petite variation des paramètres de conception sur le coût du produit), ces modèles

spécifiques demeurent trop restreints et particuliers. Qui plus est, contrairement aux modèles universels, leur maintenance et leur mise à jour doivent être assurées par le concepteur utilisateur. Ce qui implique une surcharge de travail non-négligeable.

Les différentes approches du coût en conception (approches détaillée, analogique, paramétrique) ayant été présentées, il est possible de montrer maintenant comment construire une fonction d'estimation du coût (FEC).

3 Construction d'une fonction d'estimation du coût (FEC)

3.1 Démarche générale

La construction d'une fonction d'estimation du coût doit être accomplie de manière méthodique. Aussi, sa première étape consiste à élaborer un cahier de charges complet, définissant, entre autres : le cadre dans lequel s'inscrit cette construction, le système de coût référent, les utilisateurs et leur domaine d'activité, etc. Une fois cette étape initiale menée et validée, il est possible de suivre la séquence présentée en figure 11.

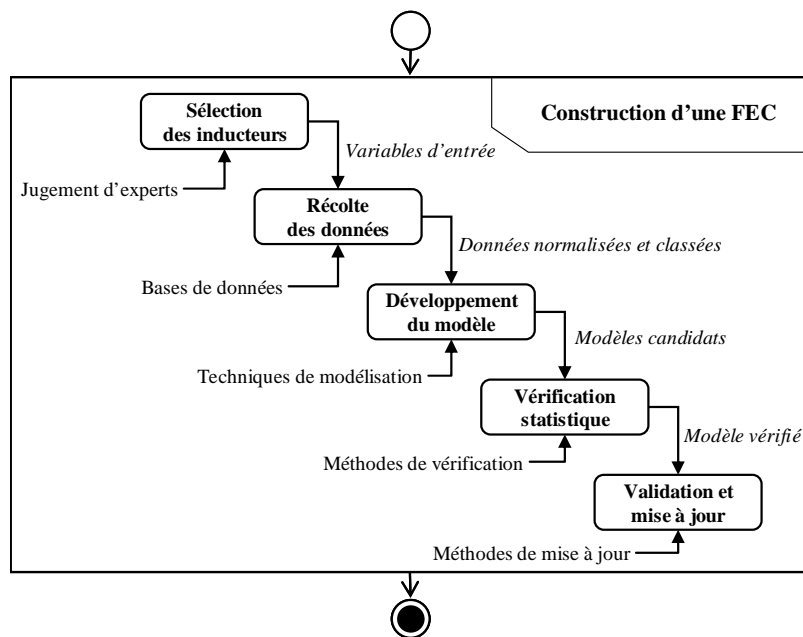


Figure 11. Construction d'une FEC

La première étape consiste à sélectionner les inducteurs de coûts en suivant la démarche exposée en 2.3. Soulignons encore une fois que le point critique, lors de cette étape, est la qualité de la collecte de données et du recueil de jugements d'experts. Des méthodes formelles ont été proposées pour en assister la réalisation, mais les résultats d'études de terrain montrent deux choses : la FEC recherchée traite le plus souvent d'inducteurs relevant d'un même domaine ou métier, et la source principale de données demeure les jugements d'experts dudit métier.

La deuxième étape consiste à récolter les multiples informations économiques et techniques, puis à analyser les données, de sorte à développer des FEC pertinentes et exactes. C'est à partir de l'analyse des variables explicatives, à savoir les inducteurs de coût, qu'est modélisée soit la variable expliquée, soit le coût paramétrique. Cependant, l'intégration des données provenant de diverses sources, internes et externes à l'entreprise, ne garantit pas la cohérence et la compréhension de la causalité entre les inducteurs et le coût du produit.

La troisième étape de la construction de la FEC consiste à développer le modèle paramétrique. L'enjeu consiste alors à trouver la meilleure expression du rapport entre les inducteurs et la variable objectif, le coût. Nous avons vu que, le plus souvent, les régressions linéaires sont utilisées.

La quatrième étape consiste à vérifier la qualité du modèle paramétrique proposé. Dans la plupart des études théoriques, la préoccupation principale des chercheurs est souvent liée à la précision du modèle paramétrique obtenu. Cependant, il existe d'autres critères, comme la complexité, la robustesse, l'amplitude de l'intervalle de confiance, etc., qui peuvent être mobilisés. Ainsi, si nous disposons de la FEC suivante :

- N , le nombre des observations (i) utilisées pour le développement de la FEC ;
- M , le nombre d'inducteurs indépendants x_i ;
- P , le nombre de paramètres de la FEC ;
- y_i , le coût standard observé ;
- \hat{y}_i , le coût estimé pour l'observation i ;
- e_i , l'erreur estimée par la FEC ($e_i = y_i - \hat{y}_i$).

L'ensemble de ses critères de qualité peut être recensé dans le tableau 2. Plus leur valeur est faible, meilleure est la précision de la fonction d'estimation du coût. Le choix éventuel d'un seul d'entre eux dépend de plusieurs facteurs, comme la fiabilité de leur réponse, leur capacité à prendre en compte la grandeur des observations dans des réponses hétérogènes, à amortir des points extrêmes, etc. [ARM 01].

La cinquième étape de la construction de la FEC consiste à valider et à mettre à jour le modèle obtenu. Cette étape, qui peut conduire à réitérer une nouvelle construction, est importante, au sens où l'estimation paramétrique présente toujours les mêmes limites, qui sont :

- la dépendance à un jugement d'expert, qui change le plus souvent au cours du temps ;
- l'importance des données historiques pour la valider, alors qu'elles sont l'expression de problèmes de conception passés, pas toujours ceux du présent ou, *a fortiori*, à venir ;
- la dépendance aux inducteurs, sachant que rien ne garantit d'obtenir du premier coup les bons inducteurs, ce qui, compte tenu du temps et de la charge de travail requise pour développer une FEC, peut, aux yeux du concepteur, faire perdre en légitimité l'ensemble de l'estimation paramétrique.

Indicateur de qualité de la FEC	Formule	Avantage
SNER : Somme Normalisée des Ecarts Résiduels	$\frac{\sum_{i=1}^n e_i }{\sum_{i=1}^n y_i}$	Mesure relative, tenant compte de la grandeur des observations et comparant l'erreur par rapport à l'ensemble de la population.
MRE ou APE, valeur absolue de l'erreur relative (<i>Magnitude Relative Error</i>)	$\left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right $	Différence normalisée entre les coûts standard observés et le coût estimé pour un cas particulier.
MMRE ou MAPE, moyenne des valeurs absolues des erreurs relatives	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right $	Dispersion des pourcentages d'erreur d'estimation pour l'ensemble des observations.
MdAPE, médiane de APE (<i>Median Absolute Percentage Error</i>).	$\text{Médiane} \left \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right $	Mesure robuste.
MSE, moyenne des carrés des erreurs.	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i)^2$	Estimation de la variance $\hat{\sigma}_e^2$
RMSE (<i>Root Mean Square Error</i>), ou racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques	$\sqrt{\frac{1}{(n-p)} \sum_{i=1}^n (e_i)^2}$	Pénalise les écarts importants de l'estimation. Très utilisée comme mesure interne pour la généralisation des modèles.

Tableau 2 Exemples d'indicateurs de qualité d'une FEC

4. Enjeux stratégiques et organisationnels

Tout projet évolue dans un cadre temporel contraint strict, dispose de moyens limités et répond à des objectifs aussi précis qu'urgents [MID 96]. De ce fait, il est la plupart du temps hors de question de reconcevoir l'intégralité du produit, d'explorer systématiquement l'espace des solutions possibles, alors même qu'une certaine créativité, inventivité,

est de plus en plus demandée au concepteur ! Pour concilier ces exigences contradictoires, il est indispensable qu'une stratégie de choix technico-économique en conception soit mise au point. La réflexion stratégique a pour but d'identifier les axes à privilégier avant, pendant et après le projet. Elle a lieu au départ du projet, au moment de la construction de l'organisation idoine. Par ailleurs, des pauses d'orientation doivent être prévues, au moins à deux moments clef du projet, à savoir :

- au moment du choix entre les grandes options qui conditionneront l'architecture du produit ;
- une fois cette architecture validée, au moment de l'engagement ou non dans l'exploration des voies de solution, que ce soit pour développer des sous-systèmes ou assurer au mieux la gestion des interfaces entre composants du produit.

Le choix technico-économique en conception ne doit pas être isolé, il se doit d'être apprenant. Pour cela, quelques principes peuvent être respectés. Sans prétendre à une quelconque exhaustivité, ceux-ci s'énoncent comme suit :

- toute information technico-économique stratégique collectée doit être partagée au sein d'un dispositif de veille d'entreprise, s'il en existe un ;
- toute expression de besoin formalisée, toute spécification fonctionnelle, doit être mémorisée au sein d'un dispositif permettant sa réutilisation ultérieure. Les cahiers des charges fonctionnels sont, de fait, facilement réutilisables, puisque leur adaptation à un nouveau contexte se fait le plus souvent à peu de frais ;
- toute modélisation validée de données technico-économiques doit être, elle aussi, mémorisée et mise à la disposition de l'ensemble des équipes projet actuelles et à venir ;
- toute estimation technico-économique du produit développée réalisée a posteriori, par exemple lors de revues de projet, doit être décrite et archivée, même si elle reste à un niveau général ;
- l'ensemble des choix technico-économiques faits le long du projet doivent être enregistrés, de façon à garantir la traçabilité détaillée des décisions au cours des projets.

5 Références bibliographiques

- [ANG 06a] ANGENIOL S., Maîtrise et intégration des coûts dans les projets de conception aéronautiques, Thèse de doctorat, 2006, Ecole Centrale Paris.
- [ANG 06b] ANGENIOL S., YANNOU B., GARDONI M., CHAMEROIS R., « Vers une amélioration du rôle des équipes support Design to Cost dans l'aéronautique », Bonjour E., Yannou B. (Dir.), *Évaluation et décision en conception*, 2006, Hermès Publishing, Paris, pp.179-190.
- [ARM 01] ARMSTRONG J.S., *Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and practitioners*, KAP, 2001, Boston.
- [BEL 02] BELLUT S., *La compétitivité par la maîtrise des coûts*, 2002, AFNOR Gestion, Paris.
- [BOU 06] BOUQUIN H., *Comptabilité de gestion*, 2006, Économica, Paris.
- [CAM 04] CAMARGO M., Estimation paramétrique des coûts des produits finis dans la filière textile – habillement, thèse de doctorat, 2004, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [CAM 06] CAMARGO M., JOLLY-DESODT A.-M., CASTELAIN, J.-M., « Estimation des coûts des industries à haut degré de diversité : modèles interprétables neuro-flous », Bonjour E., Yannou B. (Dir.), *Évaluation et décision en conception*, 2006, Hermès Publishing, Paris, pp.165-177.
- [DON 03] DONG, C.S., ZHANG, C. AND WANG, B., Integration of Green Quality Function Deployment and Fuzzy Multi-Attribute Utility Theory-Based Cost Estimation for Environmentally Conscious Product Development. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, 11(1), 2003, pp.12-28.
- [DUV 96] DUVERLIE, P., Etude et proposition d'une méthode d'estimation du coût de revient technique appliquée à la production mécanique et basée sur le raisonnement à partir de cas, thèse de doctorat, 1996, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- [EHR 95] EHRLENSPIEL K., *Integrierte Produktentwicklung ; Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion*, 1995, Hanser Verlag, Berlin.
- [FAR 01] FARINEAU T., *Etude et définition d'outils d'analyse économique en phase d'avant-projet appliqués à la production mécanique: Application aux coûts d'usinage*, thèse de doctorat, 2001, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- [FRE 76] FREIMAN F., « PRICE: a cost Predicting Model », Design to Cost Conference Proceedings, San Francisco, 1976, pp.576-589.
- [GRA 96] GRANGE P., *Piloter les coûts des produits industriels : outils et méthodes pour concevoir à moindre coût*, 1996, Dunod, Paris.
- [IDR 03] IDRI A. Un Modèle Intelligent d'estimation des Coûts de Développement de Logiciels, thèse doctorale en Informatique Cognitive, Université du Québec à Montréal (UQAM), 2003, Montréal.

- [JAC 96] JACOT J-H., MICAËLLI J-P., « La question de la performance globale », Jacot J-H., Micaëlli J-P. (Coord.), *La performance économique en entreprise*, 1996, Hermès, Paris, pp.15-33.
- [MIC 03] MICAËLLI J-P., FOREST J., *Artificialisme : Introduction à une théorie de la conception*, 2003, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- [MIC 05] MICAËLLI J-P., WISSER W., « Intégrer l'utilisateur dans la conception », Forest J., Méhier C., Micaëlli J-P. (Dir.), *Science de la conception : fondements, méthodes, pratiques*, Pôle éditorial de l'UTBM, pp.77-91, Belfort.
- [MID 96] MIDLER C., *L'Auto qui n'existait pas*, 1996, Interéditions, Paris.
- [NAS 99] NASA, *Parametric Estimating Handbook*, 1999, Washington (DC).
- [OUL 06a] OULD M., *Contribution à une méthode de chiffrage paramétrique dédiée à la conception amont de systèmes mécaniques*, Thèse de Doctorat, 2006, UTBM.
- [OUL 06b] OULD M., MICAËLLI J-P., FERNEY M., DECREUSE C., « KOSTIMATOR, une méthode d'estimation du coût paramétrique en conception », Bonjour E., Yannou B. (Dir.), *Évaluation et décision en conception*, 2006, Hermès Publishing, Paris, pp.153-164.
- [PAH 07] PAHL G., BEITZ W., FELDHOUSEN J., *Engineering Design*, 2007, Springer Verlag, Berlin.
- [ROY 03] ROY R., « Cost engineering: why, what and how ? », *Decision Engineering Report Series*, 2003, Cranfield University.
- [RUS 01] RUSH C., ROY R., « Expert judgement in cost estimating: Modelling the reasoning process », *Concurrent Engineering Research and Applications Journal*, 9(4), 2001, pp.271-284.
- [SIM 97] SIMON H-A., *The Science of the Artificial*, 1997, MIT Press, Cambridge (MA).
- [STA 00] STANKIEWICZ R., « The Concept of « Design Space » », Ziman J. (Ed.), *Technological Innovation as an Evolutionary Process*, 2000, Cambridge University Press, pp.234-247, Cambridge (MA).
- [SUH 90] SUH N., *Principles of Design*, 1990, Oxford University Press, Cambridge (MA).
- [TOR 02] TORNBERG K., JÄMSEN M., PARANKO J., « Activity-based costing and process modeling for cost-conscious product design: A case study in a manufacturing company », *International Journal of Production Economics*, 79(2002), pp.75-82.
- [ULR 00] ULRICH, K-T., EPPINGER, S-D., *Product Design and Development*, 2000, McGraw-Hill, New-York (NY).
- [WEU 00] WEUSTINK I. F., BRINKE, E., STREPPPEL A. H. AND KALS H. J. J., « A generic framework for cost estimation and cost control in product design », *Journal of Materials Processing Technology*, 103(1), June 2000, pp.141-148.